

文章编号:0253-9985(2011)06-0946-06

鄂尔多斯盆地大牛地低渗气田产水规律

周俊杰¹,李颖川²,宋东斌¹,钟海全²,刘通¹

(1. 西南石油大学, 四川 成都 610500; 2. 西南石油大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500)

摘要:根据鄂尔多斯盆地大牛地低渗气田的历史生产数据、水样分析资料及天然气饱和含水量计算方法,定性、定量地分析了产水来源。同时,根据平均产气量和累计水、气比对气井进行了分类,分析了气田不同层位与不同井型单井的产水规律。结果表明,鄂尔多斯盆地大牛地低渗气田单井的产水量和产气量均较低;气田产出的水有凝析水、地层水和工作液,以地层水为主。不同层位表现出不同的生产特征。二叠系下石盒子组3层位和山西组1层位为低产水高产气层位,二叠系下石盒子组1层位和二叠系下石盒子组2层位为低产水低产气层位,山西组2层位和太原组2层位为高产水低产气层位。不同井型单井的产气量无明显差别,但水平井的产水量更大,水、气比更高。分析结果对选择排水工艺和分析生产情况具有重要的指导意义。

关键词:水源分析;产水规律;低渗气藏;大牛地气田;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE33+2

文献标识码:A

Water production pattern of Daniudi low-permeability gas field, Ordos Basin

Zhou Junjie¹, Li Yingchuan², Song Dongbin¹, Zhong Haiquan², Liu Tong¹

(1. Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. State Key Lab of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

Abstract: Calculation method of saturated water content of natural gas was adopted to qualitatively and quantitatively analyze produced water sources based on the production data and water sample test results of Daniudi low-permeability gas field in Ordos Basin. Moreover, gas wells were classified according to average gas yield and cumulative water and gas ratio (WGR), and water production patterns of different pay zones and single well of various types were analyzed. It is concluded that both water production and gas yield of single well are low in Daniudi low permeability gasfield in Ordos basin. The produced water consists of condensate water, formation water and operating fluid, of which the formation water is predominant. Different pay zones show different production behaviors. The third pay zone in the Permian Xiashihezi Formation and the first pay zone in the Permian Shanxi Formation feature in low water production but high gas production. The first and second pay zones in the Permian Xiashihezi Formation show both low water production and low gas production. The second pay zone in the Shanxi and Taiyuan formations are characterized by high water but low gas production. The gas production of single wells of different types is almost same, but horizontal wells produce more water with a higher WGR. These results can be used to guide selection of water discharging technologies and analysis of production performance.

Key words: water source analysis, water production pattern, low permeability gas reservoir, Daniudi gasfield, Ordos Basin

鄂尔多斯盆地大牛地气田^[1-2]地处陕西榆林市与内蒙古鄂尔多斯市交界地区,构造上位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡北部东段。主要的开发层系

为二叠系下石盒子组(盒1、盒2、盒3)、山西组(山1、山2)、石炭系太原组(太1、太2)。气田属低渗无边底水致密砂岩气藏,在开发过程中普遍

收稿日期:2010-10-20;修订日期:2011-11-15。

第一作者简介:周俊杰(1984—),男,博士研究生,油气田开发。

基金项目:国家科技重大专项(2008ZX05045);国家自然科学基金项目(51104125)。

见水,大部分井从投产初期就开始产水。气井产水容易引起井底积液,造成天然气水合物的生成,影响气井的正常生产,降低了气藏的采收率。

在气田出水水源辨识和出水规律分析方面,国内学者进行过一些研究^[3-6]。这些研究都是在地层构造、产出水化学分析、测井解释、产出剖面测试以及生产数据等资料的基础上,基于现场经验,定性分析出水水源,总结出出水规律,对现场实施防水治水措施及开发气藏具有一定的指导意义。但是,这些研究都只是对气田出水进行了定性描述,没有计算各种水源的产量。本文在判定气田出水水源类型的基础上,应用天然气饱和含水量计算方法,定量分析了大牛地气田的出水水源,并从产气量和累计水、气比出发对气井进行了分类。分析了气田的不同层位与不同井型气井的出水规律。

1 生产特征

统计鄂尔多斯盆地大牛地气田 124 口气井的生产数据(图 1,图 2),总结气、水生产特征如下。

1) 气田的气井无水采气期短,出水时间普遍较早,大多气井从投产开始就是气水同产。

2) 单井的产气量和产水量普遍较低。平均产气量为 $0.16 \times 10^4 \sim 4.76 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,平均值为 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;平均产水量为 $0.06 \sim 5.40 \text{ m}^3/\text{d}$,平均值为 $0.64 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

3) 水、气比普遍较低,变化趋势以稳定为主。

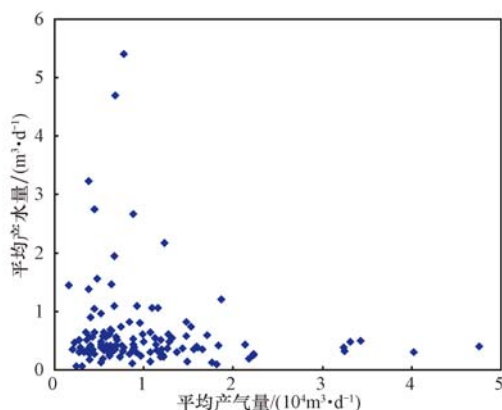


图1 鄂尔多斯盆地大牛地气田单井
平均产水量与平均产气量的关系

Fig.1 Relationship of average water and gas
production in Daniudi gas field, Ordos Basin

79%的井平均水、气比小于 $1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^3$;19%的井平均水、气比为 $(1 \sim 3) \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^3$;2%的井平均水、气比大于 $3 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。

2 出水水源定性分析

2.1 地质规律

根据国内外有水气藏的开采经验,不论是底水气藏还是边水气藏,砂岩地层还是碳酸盐岩地层,气井投产后一般都有无水采气阶段。只有水体距离井很近或井钻遇水层时,才可能在投产的初期产水^[7]。大牛地气田的气井无水采气期短,大多气井从投产开始就是气水同产。因此,大牛地气田产出的地层水非底水或边水,而是广泛分布在储层中的残余地层水。

2.2 产出水化学特征

根据鄂尔多斯盆地大牛地气田 116 口井 399 次水样测试数据,分析产出水的化学特征^[8-9]如下:①矿化度为 $36.40 \sim 27\,149.36 \text{ mg/L}$,平均值为 $6\,805.88 \text{ mg/L}$; Cl^- 含量在 $27.89 \sim 103\,268.74 \text{ mg/L}$,平均值为 $19\,893.16 \text{ mg/L}$ 。当有地层水产出时, Cl^- 含量和矿化度都会显著增加;②阴离子含量大于阳离子含量, Cl^- (占阴离子总量的 83%), K^+/Na^+ (占阳离子总量的 55%), Ca^{2+} (占阳离子总量的 31%) 占优势,含少量的 HCO_3^- , SO_4^{2-} 和 Mg^{2+} ;③产出水水型判别为 CaCl_2 型。

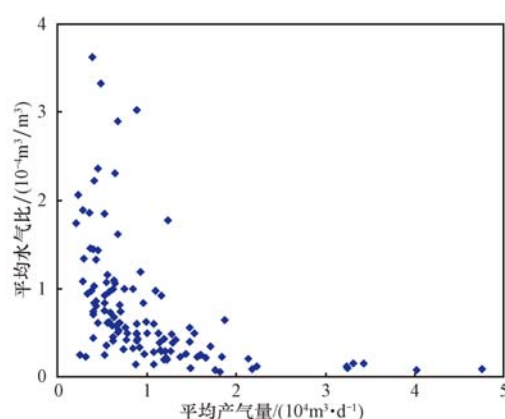


图2 鄂尔多斯盆地大牛地气田单井
平均水、气比与平均产气量的关系

Fig.2 Relationship of average WGR and average gas
production of single well in Daniudi gas field, Ordos Basin

表 1 鄂尔多斯盆地大牛地气田产出水水源判别

Table 1 Identification of produced water sources in Daniudi gas filed, Ordos Basin

特征系数	凝析水	工作液	地层水
矿化度/(g · L ⁻¹)	<20	>50	>50
脱硫系数/[100c _{SO₄²⁻ · (c_{Cl⁻})⁻¹]}	变化	>0.1	<0.1
钠氯系数/[c _{Na⁺} · (c _{Cl⁻}) ⁻¹]	变化	0.18 ~ 0.70	0.09 ~ 0.70
钠钙系数[c _{Na⁺} · (c _{Ca²⁺}) ⁻¹]	变化	1.56 ~ 18.41	0.35 ~ 24.62

2.3 水源定性分析

鄂尔多斯盆地大牛地气田产出水可分成 3 类,并根据水源的化学特征,定性判断产出水的主要成因。①凝析水:气井生产过程中,随着温度和压力的不断降低,饱和水蒸气含量减少,部分水蒸气凝聚成液态水,被天然气携带出井筒。产出特征为:矿化度低,产水量和水、气比较低。②地层水:存在于毛细管、孔隙中的水,随着地层压力下降,岩石与水体本身膨胀,地层水随天然气产出。产出特征为矿化度及 Cl⁻ 含量较高,产水量和水、气比较高。③工作液:在钻井或措施后的一段时间,工作液返排回地面。产出特征为产水时间短,产水量高,产出水与工作液的化学组成相近(表 1)。

3 产水水源定量分析

在地层和井筒的温度压力下,天然气通常都含有一定量的饱和水蒸汽,饱和含水量的大小取决于天然气的温度、压力和气体的组成等条件。前人对此做了大量的研究工作,研制了一些算图和经验公式^[10-15]。迄今为止,应用最多的是 McKetta-Wehe 算图^[16],文献[6]对该算图进行了数学模拟,并进行了相对密度和含盐量的校正,增加了算图的适用性。McKetta-Wehe 算图适用于非酸性天然气(酸性气体含量小于 5%的天然气),大牛地气田产出的天然气为非酸性天然气,符合该算法的适用条件。

通过下式计算气井的凝析水含量 Q_{wn} ^[17]。

$$Q_{wn} = Q_g(Q_{ws} - Q_{wh}) \quad (1)$$

式中: Q_{ws} 为地层状态下的天然气饱和含水量,10⁻⁴ m³/m³; Q_{wh} 为井口状态下的天然气饱和含水量,10⁻⁴ m³/m³; Q_g 为产气量,10⁴ m³; Q_{wn} 为凝析水产量,m³。

大牛地气田的产出水由凝析水、地层水和工

表 2 鄂尔多斯盆地大牛地气田产出水构成

Table 2 Compositions of produced water in Daniudi gas field, Ordos Basin

井号	凝析水		地层水		工作液	
	产量/ (m ³ · d ⁻¹)	占产水 比例, %	产量/ (m ³ · d ⁻¹)	占产水 比例, %	产量/ (m ³ · d ⁻¹)	占产水 比例, %
井 1	0.59	5.67	6.74	64.60	3.10	29.73
井 2	0.03	7.89	0.20	62.72	0.09	29.39
井 3	0.04	17.22	0.12	53.25	0.07	29.53
井 4	0.01	1.00	0.77	69.00	0.34	30.00
井 5	0.04	6.46	0.37	64.14	0.17	29.40
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
井 124	0.02	3.09	0.37	67.48	0.16	29.43
平均值	0.06	8.70	0.39	61.37	0.19	29.93

作液构成。已知日工作液量和日产水量,计算出日凝析水产量,即可得到日地层水产量。

利用上述方法,定量分析大牛地气田的 124 口气井的产水情况,计算得到各口井各种水源的平均产量及其占总出水的比例(表 2)。

由表 2 可见,气田的产出水中,以地层水为主,占总出水量的 61.37%;其次是工作液,占总出水量的 29.93%;凝析水产出量最少,占总出水量的 8.70%。

4 气水产出规律分析

在实际生产中,大牛地气田的气井按平均产气量分为 3 类^[18]:①高产井:平均产气量大于 2 × 10⁴ m³/d;②中产井:平均产气量为(1 ~ 2) × 10⁴ m³/d;③低产井:平均产气量小于 1 × 10⁴ m³/d。对 124 口单层开采气井按产气量大小分类(图 3a),低产井最多,中产井次之,高产井最少。

气井的累计水、气比(WGR)是气井的累计产水量与累计产气量的比值。累计水、气比越大,表明气井的产水程度越高。

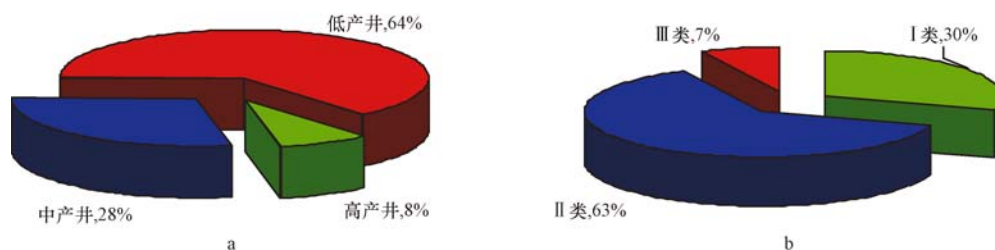
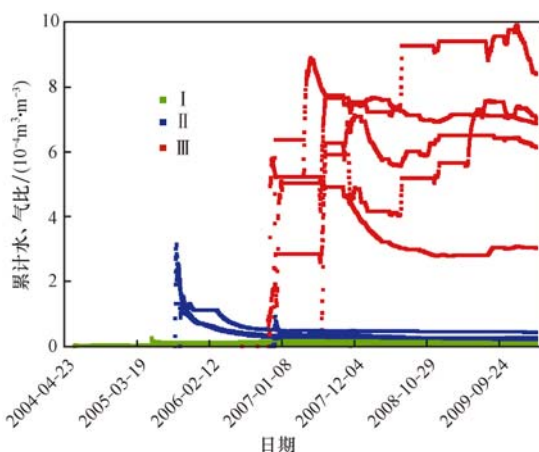


图3 鄂尔多斯盆地大牛地气田各类井井数及占总井数的比例

Fig 3 Well count and its percent in the total well number for each well type in Daniudi gas field, Ordos Basin

a. 按产气量分类; b. 按累计水、气比分类

图4 鄂尔多斯盆地大牛地气田单井
累积水、气比与时间的关系Fig 4 Cumulative WGR of single well vs. time in
Daniudi gas field, Ordos Basin

$$WGR = \sum_{i=1}^n Q_{wi} / \sum_{i=1}^n Q_{gi} (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中: WGR 为气井的累计水、气比; n 为气井的生产天数, d 。

对大牛地气田的 84 口单层开采且开采时间超过两年的气井的累积水、气比进行分析(图 4), 根据累计水、气比与时间的关系曲线, 将井划分为 3 类。

1) I 类: 低水、气比井

累计水、气比小于 $0.2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。产出水以凝析水为主, 出水对产气的影响很小, 出水量小, 产气稳定。这类井均能自行排液, 无须采用排水工艺。

2) II 类: 中水、气比井

累计水、气比 $(0.2 \sim 1) \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。产出水以束缚水为主, 产水对产气的影响不大, 产水量较小, 产气稳定。开发初期, 累计水、气比迅速上升。随着气井的开发, 累计水、气比下降并趋于稳

定。这类井基本都能自行排液。在合理配产的基础上, 在井筒压力较低时须采用排水工艺。

3) III 类: 高水、气比井

累计水、气比大于 $1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^3$ 。产出水以层间水为主, 出水对产气的影响大, 出水量大, 产气不稳定。这类井无法自行排液。在合理配产的基础上, 仍必须采用排水工艺。

分析各类井所占总井数的比例(图 3b), 在 84 口分析井中, II 类井占 63%, 说明大部分井的累计水、气比较为平缓。

4.1 不同层位出水规律

对不同层位, 按产气量和累积水、气比进行分类(图 5)。盒 3 层位和山 1 层位为低产水高产气层位, 包括了所有的高产气井。I 类井所占比例较大, 产气量大, 产水量小, 累积水、气比低。盒 1 层位和盒 2 层位为低产水低产气层位, 含中产井与低产井, 由 I 类井和 II 类井构成, 产气量比产水量小, 累积水、气比低。山 2 层位和太 2 层位为高产水低产气层位, 低产井占 80% 以上, 包含了所有的 III 类井, 产气量小, 产水量大, 累积水、气比高。

4.2 不同井型产水规律

对不同井型, 按产气量和累计水、气比进行分类分析(图 6)。水平井的高产井比例略高于直井, 中产井与低产井的比例相近(图 6a)。水平井中 III 类井比例高于直井, 即水平井的累积水、气比高于直井(图 6b)。分析不同井型的平均产气量与平均水、气比的关系(图 7)。两类井的平均产气量相近, 水平井的平均水、气比明显高于直井。

由此可见, 水平井与直井的产气量相近, 水平井的产水量和累计水、气比均高于直井, 产水对产气的影响更大。

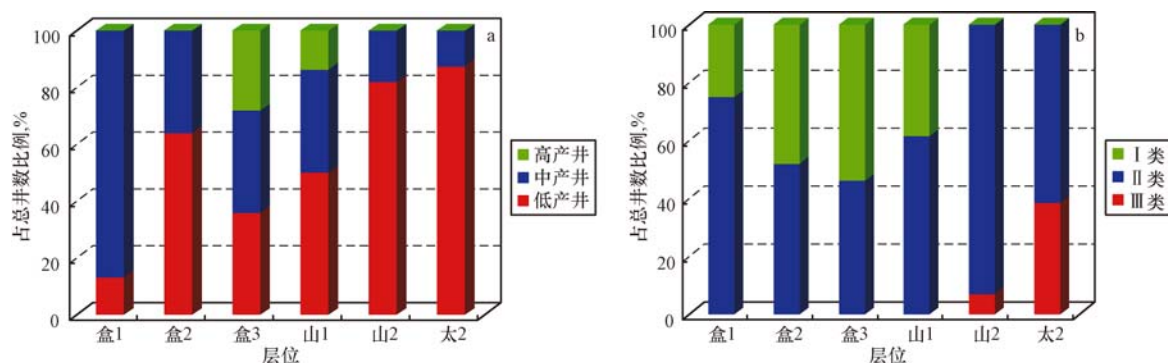


图5 鄂尔多斯盆地大牛地气田不同层位井的分类

Fig 5 Classification of wells by pay zones in Daniudi gas field, Ordos Basin

a. 按产气量分类; b. 按累计水、气比分类

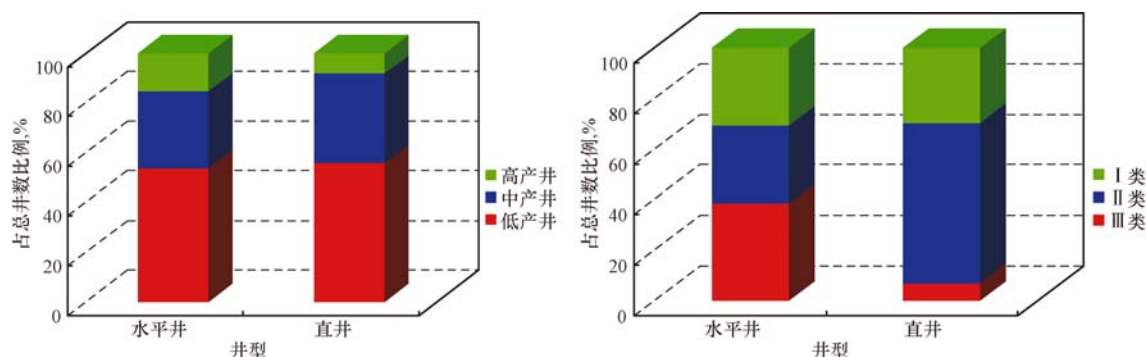


图6 鄂尔多斯盆地大牛地气田不同井型的分类

Fig 6 Classifications of wells by well types in Daniudi gas field, Ordos Basin

a. 按产气量分类; b. 按累计水、气比分类

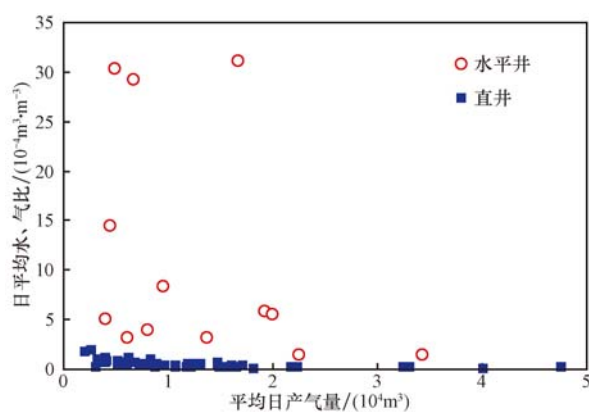


图7 鄂尔多斯盆地大牛地气田不同井型的平均水、气比与平均产气量的关系

Fig 7 Average WGR vs. average gas production of different well types in Daniudi gas field, Ordos Basin

5 结论

1) 基于气田的气井生产特征, 借鉴气藏开采

规律, 结合产出水化学分析, 判定大牛地气田产出水水源有凝析水、地层水和工作液, 并给出了定性判别水源的方法。

2) 利用天然气饱和含水量计算方法, 计算了各种水源的产出量。大牛地气田产出水以地层水为主, 工作液次之, 凝析水最少。

3) 根据累计水、气比将气井分为3类。①低累计水、气比井: 累计水、气比小于 $0.2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^3$, 产出水以凝析水为主, 均能自行排液。②中累计水、气比井: 累计水、气比在 $(0.2 \sim 1) \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^3$, 产出水以束缚水为主, 大都能自行排液, 在井筒压力较低时须采用排水工艺。③高累计水、气比井: 累计水、气比大于 $1 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m}^3$, 产出水以层间水为主, 无法自行排液, 必须采用排水工艺。

4) 根据对不同层位和不同井型的井进行分析。盒3层位和山1层位为低产水高产气层位, 盒1层位和盒2层位为低产水低产气层位, 山2层位和太2层位为高产水低产气层位; 水平井和直

井的产气量无明显差别,水平井的产水量和累计水、气比更高,出水对产气的影响更大。

参 考 文 献

- [1] 郝蜀民,惠宽洋,李良.鄂尔多斯盆地大牛地大型低渗气田成藏特征及其勘探开发技术[J].石油与天然气地质,2006,27(6):762-768.
Hao Shumin, Hui Kuanyang, Li Liang. Reservoiring features of Daniudi low-permeability gas field in Ordos basin and its exploration and development technologies[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(6): 762-768.
- [2] 罗东明,谭学群,游瑜春,等.沉积环境复杂地区地层划分对比方法——以鄂尔多斯盆地大牛地气田为例[J].石油与天然气地质,2008,29(1):38-44.
Luo Dongming, Tan Xuequn, You Yuchun, et al. Stratigraphic division and correlation in areas with complicated sedimentary environment—a case study of Daniudi gas field in the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(1): 38-44.
- [3] 张丽因,李笑萍,赵春森,等.气井产出水的来源及地下相态的判断[J].大庆石油学院学报,1993,17(2):107-110.
Zhang Linan, Li Xiaoping, Zhao Chunsen, et al. The judgement on the origin and the phase state in underground reservoir of produced water in gas well[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 1993, 17(2): 107-110.
- [4] 惠健,刘健仪,李颖川,等.异常高温凝析气藏产水规律综合研究[J].天然气工业,2004,24(7):89-91.
Hui Jian, Liu Jianyi, Li Yingchuan, et al. Intergrated study on water producing law of condensate reservoirs with anomaly high temperature[J]. Nature Gas Industry, 2004, 24(7): 89-91.
- [5] 孙来喜,武榭棠,朱绍鹏.低渗透无边、底水气水同产气藏产水原因分析[J].天然气工业,2008,28(1):113-115.
Sun Laixi, Wu Jiantang, Zhu Shaopeng. Reasons of producing water in the low-permeability gas/water reservoirs without edge/bottom water[J]. Nature Gas Industry, 2008, 28(1): 113-115.
- [6] 孙虎法,王小鲁,成艳春,等.水源识别技术在涩北气田气井出水中的应用[J].天然气工业,2009,29(7):76-78.
Sun Hufa, Wang Xiaolu, Cheng Yanchun, et al. The application of water source identification to control water breakthrough in gas wells of the Sebei gas field[J]. Nature Gas Industry, 2009, 29(7): 76-78.
- [7] 孙来喜,武榭棠,张烈辉.靖边气藏产水特点及影响因素分析[J].断块油气田,2006,13(2):29-31.
Sun Laixi, Wu Jiantang, Zhang Liehui. Characteristics of water production and effect factors analysis on Jingbian gas reservoirs[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2006, 13(2): 29-31.
- [8] 姜林,宋岩,查明,等.准噶尔盆地莫索湾地区地层水研究[J].石油与天然气地质,2008,29(1):72-77.
Jiang Lin, Song Yan, Cha Ming, et al. Study on formation water in Mosuowan area of the Jungger Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(1): 72-77.
- [9] 曾溅辉,吴琼,杨海军,等.塔里木盆地塔中地区地层水化学特征及其石油地质意义[J].石油与天然气地质,2008,29(2):223-229.
Zeng Jianhui, Wu Qiong, Yang Haijun, et al. Chemical characteristics of formation water in Tazhong area of the Tarim Basin and their petroleum geological significance[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(2): 223-229.
- [10] 王俊奇.天然气含水量计算的简单方法[J].石油与天然气化工,1994,23(3):192-193.
Wang Junqi. A simple method to calculate the water content in natural gas[J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 1994, 23(3): 192-193.
- [11] Bukacek R F, Annual book of ASTM standards, Part 26[M]. Philadelphia: Amer Society for Testing & Materials, 1982.
- [12] Behr W R, Correlation eases absorber-equilibrium-line calculations for TEG-natural gas dehydration[J]. Oil & Gas Journal, 1983, 81(7): 58-62.
- [13] Kaziam F M, A quickly calculate the water content of natural gas[J]. Hydrocarbon Processing, 1996, 75(3): 105-110.
- [14] 宁英男,张海燕.天然气含水量图数学模拟与程序[J].石油与天然气化工,2000,29(2):75-77,95.
Ning Yingnan, Zhang Haiyan. Mathematical simulation and program for water content chart of sour natural gas[J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2000, 29(2): 75-77, 95.
- [15] 诸林,白剑,王治红.天然气含水量的公式化计算方法[J].天然气工业,2003,23(3):118-120.
Zhu Lin, Bai Jian, Wang Zhihong. Formulated calculation method of water content in natural gas[J]. Nature Gas Industry, 2003, 23(3): 118-120.
- [16] McKetta J J, Wehe A H, Use this chart for water content of natural gases[J]. Petroleum Refiner (Hydrocarbon Processing), 1958, 37(8): 153.
- [17] 李晓平,刘启国,孙万里,等.气井凝析液量研究[J].钻采工艺,2001,24(6):30-32.
Li Xiaoping, Liu Qiguo, Sun Wanli, et al. Study on condensate liquid for gas well[J]. Drilling & Production Technology, 2001, 24(6): 30-32.
- [18] 张文洪,龚才喜,李克智.大牛地气田采气工艺技术现场应用效果[J].天然气技术,2009,3(6):25-28.
Zhang Wenhong, Gong Caixi, Li Kezhi. Field application effects of gas recovery technique in daniudi Gasfield[J]. Natural Gas Technology, 2009, 3(6): 25-28.

(编辑 高岩)